

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.008

正渗透处理高盐废水时电场抑制结垢的研究

王言放, 孙雪菲, 伍鑫, 许航

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对高盐废水处理过程中正渗透(forward osmosis, FO)膜的结垢问题,文章分析外加电场对抑制 FO 膜石膏结垢的可行性;通过 COMSOL Multiphysics 研究不同电压下(± 3 、 ± 5 、 ± 10 V)的电场变化规律,探究电场变化规律对抑制结垢的影响,进一步研究电场抑制结垢的作用机制。结果表明:无电场情况下,在 10 h 的运行时间内,FO 膜水通量下降 21.6%,膜的结垢指数为 12.3%;当施加+3、-3 V 电压时,FO 膜水通量分别仅下降 11.1%、12.1%,膜的结垢指数分别为 0.6%、1.7%,且膜面结垢物质明显减少;当施加电压为正电压、电场方向为正时,抑制作用将随电压增大而增大,且施加正电压时对 FO 膜石膏结垢的抑制效果最佳,归因于介电泳(dielectrophoresis, DEP)力和电泳(electrophoresis, EP)力的协同作用,但是由于 DEP 力对石膏粒子有较强的抑制作用,不同电压下的外加电场对 FO 膜石膏结垢均有抑制作用。

关键词:高盐废水;正渗透(FO)膜;石膏结垢;电场;COMSOL Multiphysics

中图分类号:X703.1;TU991.24

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)06-0772-07

Study on inhibition of scale formation by electric field in forward osmosis treatment of high-salt wastewater

WANG Yanfang, SUN Xuefei, WU Xin, XU Hang

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem of scale formation of forward osmosis(FO) membrane in the process of high-salt wastewater treatment, the feasibility of applying electric field to inhibit gypsum scale formation on FO membrane was analyzed. COMSOL Multiphysics was used to study the electric field changes under different voltages(± 3 V, ± 5 V, and ± 10 V), explore the influence of electric field changes on the inhibition of scale formation, and further study the mechanism of the inhibition of scale formation by electric field. The results show that the flux of FO membrane decreases by 21.6% and the scaling index of the membrane is 12.3% over ten hours of operation without electric field. When +3 V and -3 V voltages are applied, the flux of FO membrane decreases by 11.1% and 12.1%, the scaling index of the membrane is 0.6% and 1.7%, respectively, and the scaling substance on the surface of the membrane is significantly reduced. When the applied voltage is positive and the direction of the electric field is positive, the inhibition effect increases with the increase of the voltage, and the inhibition effect of the positive voltage on FO membrane gypsum scaling is the best, which can be attributed to the synergistic effect of dielectrophoresis(DEP) forces and electrophoresis(EP) forces. However, due to the strong inhibition effect of DEP forces on gypsum particles, the applied electric field under different conditions can always inhibit the gypsum scale formation on FO membrane.

Key words: high-salt wastewater; forward osmosis(FO) membrane; gypsum scaling; electric field; COMSOL Multiphysics

收稿日期:2024-03-18;修回日期:2024-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978227)

作者简介:王言放(1999—),男,安徽南陵人,合肥工业大学硕士生;

孙雪菲(1984—),女,山东聊城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: xfsun2018@163.com.

近年来,在环境可持续发展趋势下工业废水零排放需求日益增强,垃圾渗滤液、煤化工废水、印染废水等高盐有机废水的处理越来越受到关注^[1]。传统高盐废水采用生物技术或高级氧化工艺(advanced oxidation process, AOP)^[2-5]进行处理,然后采用膜技术^[6]进行脱盐。在众多膜技术中,正渗透(forward osmosis, FO)是一种利用渗透压进行的自发过程,是水在渗透压差的驱动下,从高化学势一侧透过选择透过性膜流向低化学势一侧的过程^[7],相对于需要外压驱动膜技术,FO具有能耗低、截盐率低等特点^[8-9]。然而,高盐废水中含有较多高质量浓度的离子,如 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 等,会在FO膜上形成以石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)为主的污垢^[10],不仅会降低FO膜的过滤效率,增加膜清洗难度,还会对膜产生不可逆转的损伤。

FO膜石膏结垢的控制方法主要有膜表面化学改性^[11-13]、运行条件优化^[14-15]、膜界面化学清洗^[16-17]等。膜表面化学改性在一定程度上可以缓解石膏结垢,但是降低了膜的分离性能且增加了膜的生产成本,运行条件优化的效果有限,而频繁的清洗会增加运行成本和缩短膜使用寿命。目前,外加电场耦合膜分离技术因其高效、清洁、节能等优点受到关注。外加电场缓解膜污染主要有2种作用方式^[18-19]:位于非匀强电场中的带电粒子和电介质物质通过电泳(electrophoresis, EP)和介电泳(dielectrophoresis, DEP)作用远离膜表面,或外加电场使导电膜表面呈带电性,与带电物质产生静电排斥作用以抑制污染物吸附在膜面。但是,对于通过电场缓解FO膜石膏结垢的相关研究报道较少,对电场抑制膜结垢机制的认识还不够清晰。

本文通过给非导电膜外加一个非匀强电场,通过DEP使电介质物质石膏粒子向弱电场方向移动,并通过EP使带正电的 Ca^{2+} 远离膜表面来达到一个更好的处理效果,以验证外加电场抑制结垢的可行性;使用COMSOL Multiphysics模拟电场和水通量场,并计算DEP力、EP力和水力剪切,以分析基于力平衡的防污机理;结合实验和理论模拟结果,阐明外加电场抑制石膏结垢机制。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验所用材料有:间苯二胺、均苯三甲酰氯(上海麦克林生化科技股份有限公司),正己烷(成都市

科隆化学品有限公司), NaCl 、 CaCl_2 、 Na_2SO_4 (国药集团化学试剂有限公司),以上样品均为分析纯;聚偏氟乙烯(PVDF)滤膜(孔径为 $0.45\ \mu\text{m}$,天津市津腾实验设备有限公司)。

1.2 实验仪器与设备

实验所用设备有:BT100-1L蠕动泵(保定兰格恒流泵有限公司);AE2202电子天平、CHI1030C电化学工作站(上海舜宇恒平科学仪器有限公司);Regulus 8230高分辨场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(日本HITACHI公司)。

1.3 FO膜制备

将充分浸润的PVDF膜平铺在玻璃板上,用橡胶辊轴去除膜表面多余水分,并用自制板框进行密封固定。将适量质量分数为2%的间苯二胺水溶液倾倒在膜表面,浸润2 min后,竖直放置膜片倾倒在膜表面溶液,用橡胶辊轴去除膜表面残留溶液,然后将适量质量分数为0.15%的均苯三甲酰氯正己烷溶液倾倒在膜表面界面聚合反应1 min,沥干后将膜置于 $6\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中5 min进行热交联,从而获得FO膜。待膜自然冷却至室温后用清水洗净,放入 $4\ ^\circ\text{C}$ 去离子水中储存。

1.4 FO膜处理废水性能评价及污染膜表征

FO膜性能评价装置和外加电场时FO膜组件示意图如图1所示。首先将进料液(feed solution, FS)和汲取液(draw solution, DS)抽到各自的通道错向循环流动,错流速度恒定为 $180\ \text{mL}/\text{min}$;在膜组件的DS侧,实时监控DS质量变化,通过DS侧质量的增加计算FO水通量变化情况。

在FO膜的结垢实验中,采用模拟高盐废水($0.0275\ \text{mol}/\text{L}$ 的 Na_2SO_4 和 CaCl_2)作为FS,以 $2\ \text{mol}/\text{L}$ NaCl 溶液作为DS,两者初始运行体积分别为2.0、1.5 L。外加电场(图1b)是在FO膜两侧分别安装不同面积的钛网作为电极(面积较小、安装在膜下侧的钛网作为工作电极施加电压,面积较大、安装在膜上侧的钛网作为对电极),为探究电场抑制结垢的可行性,对工作电极只施加 $\pm 3\ \text{V}$ 电压产生电场。在FO膜性能评价过程中,温度控制在 $(25 \pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 。

以水通量 J_w 评价FO膜性能,以结垢指数 I_F 评价FO膜的结垢情况,计算公式分别为:

$$J_w = \frac{\Delta V}{A_m \Delta t} \quad (1)$$

$$I_F = \left(1 - \frac{J_w}{J_B}\right) \times 100\% \quad (2)$$

其中: ΔV 为透过膜的 FS 体积; A_m 为膜的有效面积; Δt 为测试时间; J_B 为基线实验中渗透 1 h 时水通量。

通过 SEM 分析污染 FO 膜面结垢的形态分布。

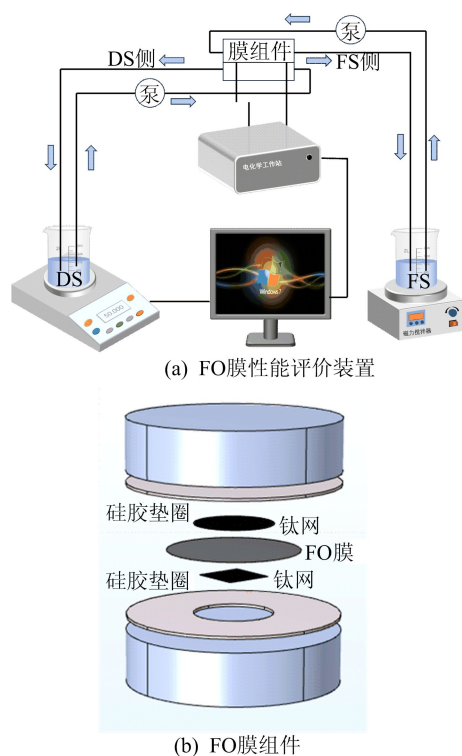


图 1 FO 膜性能评价装置和外加电场时 FO 膜组件示意图

1.5 电场作用下 FO 过程的有限元模拟

使用 COMSOL Multiphysics 进行计算模拟来验证防污机制,采用有限元法在二维域中建立 FO 膜与电场耦合的物理场,主要通过电流、蠕动流和流体粒子跟踪模块,模拟外加非匀强电场时作用在 Ca^{2+} 上的 EP 力和石膏粒子上的 DEP 力。由于在废水处理实验过程中只施加 $\pm 3 \text{ V}$ 电压探究外加电场抑制结垢的可行性,在仿真模拟时对膜下侧钛网(工作电极)施加 ± 3 、 ± 5 、 $\pm 10 \text{ V}$ 电压,探究不同电压下的电场变化对抑制结垢的影响;并以膜上侧钛网接地,其他边界设置为电绝缘。 Ca^{2+} 、石膏粒子和水的材料特性数据由 COMSOL Multiphysics 内置数据库提供。

2 实验结果与分析

2.1 FO 膜外加电场抑制石膏结垢的可行性

考察无电场(0 V)和外加电场($\pm 3 \text{ V}$)时 FO 膜水通量和结垢指数变化,结果如图 2 所示。图 2a 中, J_0 为 1 h 时 FO 膜初始水通量。从图 2a

可以看出:在 10 h 的运行时间内,随着时间增加,在 0 V 下,FO 膜水通量不断下降,最终下降 21.6%;当 FO 膜处于加电场条件时,水通量始终高于未加电场时, $+3$ 、 -3 V 下分别只下降 11.1%、12.1%。由图 2b 可知,10 h 后, 0 V 下膜结垢指数达到 12.3%, $+3$ 、 -3 V 下膜结垢指数分别只有 0.6%、1.7%,说明在外加电场条件下,膜的抗结垢性能大幅提升,这主要归因于外加电场给予的 DEP 力和 EP 力作用。此外, $+3$ 、 -3 V 下虽然有相似的水通量下降趋势和结垢指数变化情形,但是当工作电极施加正电压时,膜的水通量始终高于负电压时,结垢指数也低于负电压时,这说明不同电性电压下外加电场给予污染物的 DEP 力和 EP 力也不同。

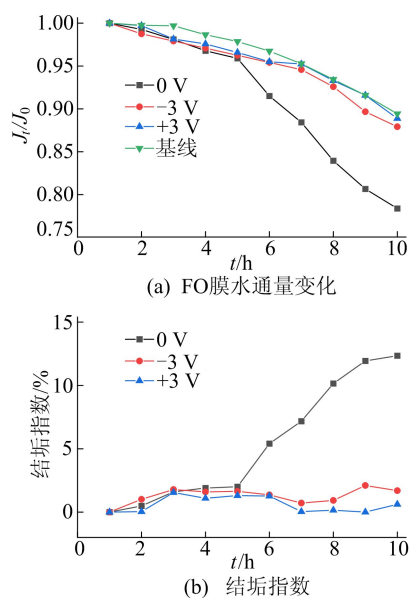


图 2 FO 膜处理高盐废水时水通量和结垢指数变化

为了更深入地探讨 FO 膜外加电场抑制石膏结垢的机理、更直观地了解膜污染情况,进一步对 0 、 $+3$ 、 -3 V 下的 FO 污染膜进行分析,FO 膜表面数码照片、SEM 图像和结垢物质能谱分析(energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS)结果如图 3 所示。从图 3 中数码照片可以看出,未加电场的膜表面结垢面积更大,而外加电场的膜表面结垢面积相对较小。图 3 中 SEM 图像显示,未加电场的膜表面聚集着范围更广、结晶更多的石膏晶体,而外加电场的膜表面石膏晶体相对较少,分布范围也较小。图 3 中 EDS 结果也显示,结垢物质主要含有 Ca (绿色)、 S (红色)、 O (蓝色)3 种元素,证实结垢物质主要为石膏晶体,与未加电场相比,外加电场的膜表面石膏晶体更少

且分布范围更小。

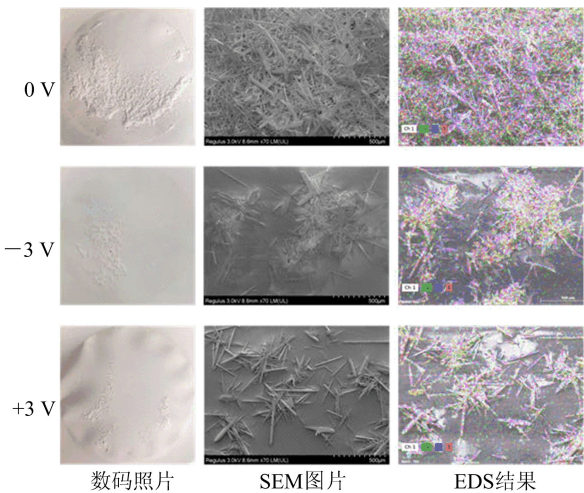


图 3 FO 膜表面数码照片、SEM 图片和结垢物质 EDS 结果

2.2 电场仿真模拟

通过 COMSOL Multiphysics 对 ± 3 、 ± 5 、 ± 10 V 下的电场进行仿真模拟和计算。

± 3 、 ± 5 、 ± 10 V 下的电场强度见表 1 所列。

表 1 ± 3 、 ± 5 、 ± 10 V 电压下的电场强度 单位: V/m		
电压/V	$E_{\max}$	$E_{\min}$
± 3	7.84×10^3	3.99×10^3
± 5	1.31×10^4	6.64×10^3
± 10	2.61×10^4	0.01

由表 1 可知:电场强度与施加电压正负性无关,与电压绝对值大小有关,当电压绝对值增大,电场强度随之增大; ± 10 V 下电场强度最大,最大电场强度($E_{\max}$)为 2.61×10^4 V/m, ± 5 V 时的电场强度次之(1.31×10^4 V/m), ± 3 V 时的电场强度最小(7.84×10^3 V/m)。施加正负电压的电场仿真模拟结果如图 4 所示。图 4 中:流线为电场线; x 为水平方向长度; y 为竖直方向的高度。

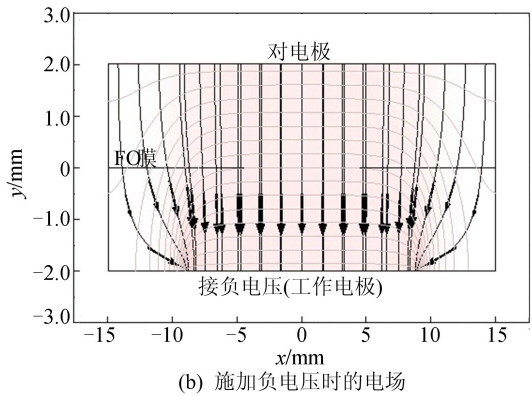
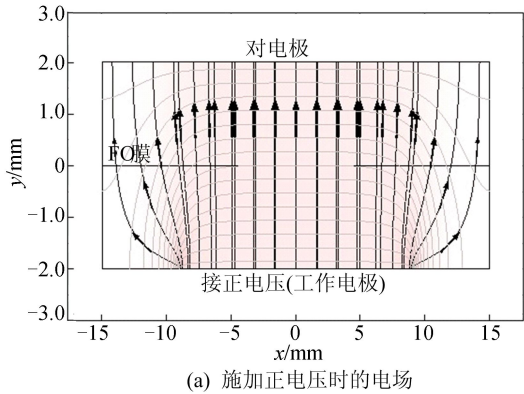


图 4 电场仿真模拟结果

由图 4 可知:不同电性电压时下的强电场和弱电场位置分别位于工作电极和对电极;施加正电压时电场线方向指向对电极(正方向),施加负电压时电场线方向指向工作电极(负方向),即施加电压电性不同时,其电场线方向相反。

2.3 DEP 抑制石膏颗粒吸附机制

外加电场产生的 DEP 对石膏粒子的抑制作用机理示意图如图 5 所示。在 FO 膜表面,石膏结垢的形成,可以通过在本体溶液中形成的石膏晶体沉积吸附在膜上(均相成核),也可以通过表面羧基($-\text{COOH}$)基团诱导的异相成核来发生,因此,石膏晶体要脱离膜表面,需要克服 FO 膜与石膏晶体的结合力,以及 FO 膜与晶体的表面相互作用力。当施加任意一个电压时,在膜两侧会形成一个非匀强电场,由于石膏是低介电常数(1.8~25.0)的电介质物质,在非匀强电场中由于极化效应会受到一个 DEP 力,以克服其与 $-\text{COOH}$ 的结合力和表面相互作用力,使其向电场强度较弱的一侧移动。此外,水流带来的水力剪切力也会配合 DEP 力抑制膜表面石膏结垢。

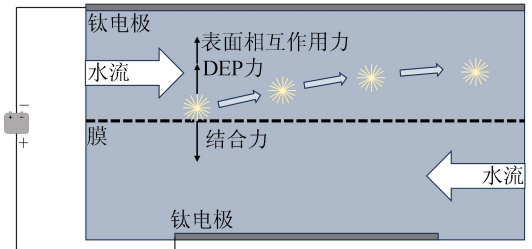


图 5 DEP 抑制石膏粒子吸附示意图

为研究不同电压下电场变化对抑制结垢的影响,通过 COMSOL Multiphysics 模拟石膏粒子在 FS 侧的 DEP,并计算 ± 3 、 ± 5 、 ± 10 V 时粒子受 DEP 力大小,DEP 模拟结果如图 6 所示,DEP 力

见表 2 所列。从图 6 可以看出,随着施加电压绝对值上升,FO 膜 FS 侧的石膏粒子数量随之减少,反之,石膏粒子数量较多且分布更广泛。其原因主要是当电压绝对值增大,外加电场整体的电场强度随之提高,而 DEP 力的决定因素之一就是电场强度大小,因此 DEP 力也随之提高,膜上方

游离的石膏粒子数量随之减少。当施加的电压大小相同、正负性不同时,石膏粒子的数量及粒子分布相似,这是由于电压的正负性虽然改变了电场方向,但对电场分布和电场强度大小几乎无影响,粒子所受 DEP 力大小十分接近,粒子的分布也更相似。

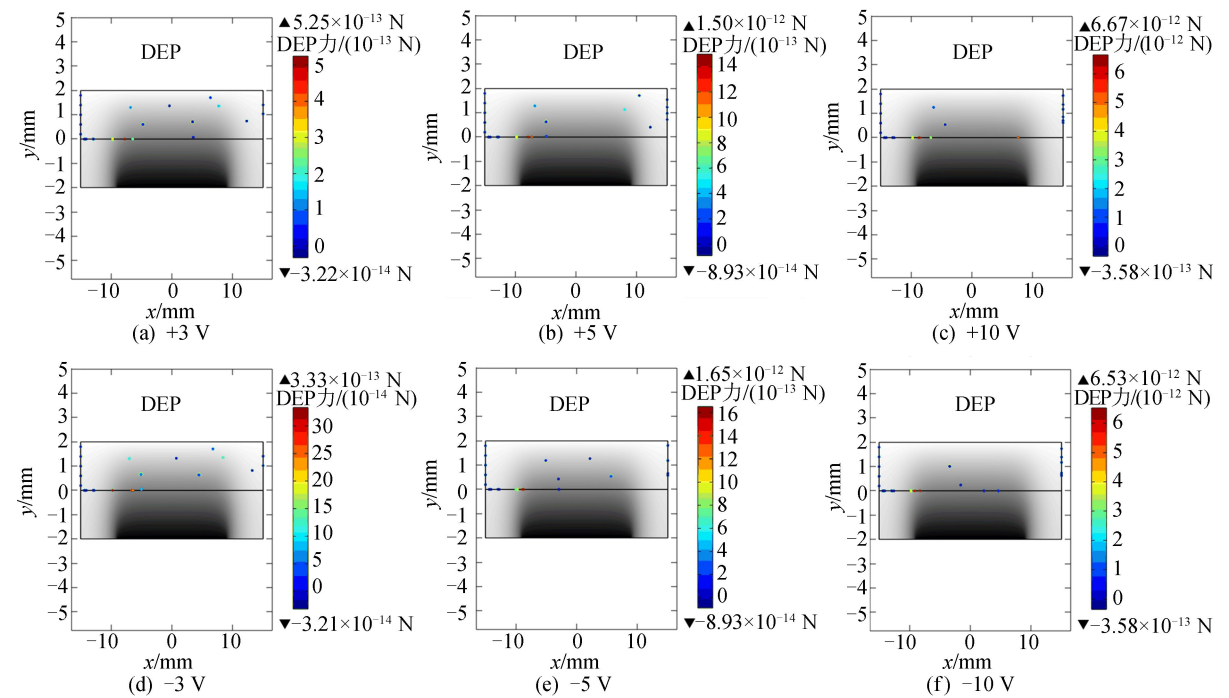


图 6 不同电压下石膏粒子 DEP 模拟结果

表 2 不同电压下的 DEP 力					单位: N	
电压/V	y 向 DEP 力		x 向 DEP 力			
	最大值	最小值	最大值	最小值		
+3	5.25×10^{-13}	-3.22×10^{-14}	3.36×10^{-13}	-6.48×10^{-13}		
-3	3.33×10^{-13}	-3.21×10^{-14}	4.25×10^{-13}	-6.48×10^{-13}		
+5	1.50×10^{-12}	-8.93×10^{-14}	1.04×10^{-12}	-1.78×10^{-12}		
-5	1.65×10^{-12}	-8.93×10^{-14}	1.55×10^{-13}	-1.83×10^{-12}		
+10	6.67×10^{-12}	-3.58×10^{-13}	2.03×10^{-12}	-7.29×10^{-12}		
-10	6.53×10^{-12}	-3.58×10^{-13}	6.95×10^{-15}	-7.29×10^{-12}		

2.4 EP 抑制 Ca²⁺ 吸附机制

外加电场产生的 EP 对 Ca²⁺ 的抑制作用机理示意图如图 7 所示。

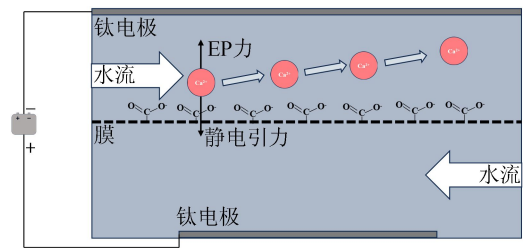


图 7 EP 抑制 Ca²⁺ 吸附示意图

DEP 可以抑制已形成的石膏晶体吸附在膜表面,但是对 Ca²⁺ 的吸附却没有抑制作用。异相成核是膜表面—COOH 基团会诱导 Ca²⁺ 吸附到膜上形成晶核,从而引发石膏晶体的生长,因此克服 Ca²⁺ 与—COOH 的静电相互作用可以抑制膜结垢。

当在工作电极上施加正电压时,在膜两侧会形成 EP 方向指向膜上方的非匀强电场,当 Ca²⁺ 进入 FS 侧时,由于 Ca²⁺ 带正电荷,会立即受到受力方向与电场一致的 EP 力,以克服其与—COOH 的静电引力。此外,水流带来的水力剪切力也会配合 EP

力来抑制 Ca^{2+} 吸附到膜表面。

为研究不同电压下电场变化对抑制结垢的影响,通过 COMSOL Multiphysics 模拟 ± 3 、 ± 5 、 ± 10 V 时 Ca^{2+} 在 FS 侧的 EP,计算粒子受 EP 力大小,EP 模拟结果如图 8 所示,EP 力见表 3 所列。由图 8 可知:当施加电压为正电压时,由于受到的 EP 力方向远离膜面,粒子多集中在膜上方的钛电极板上,且随着电压升高,EP 力随之增大,电极板上聚集的粒子数量增多,而当电压较小

时,粒子会在水力剪切力和弱 EP 力的作用下流出 FS 侧;当施加的电压为负电压时,由于受到的 EP 力方向与正电压相反,粒子多集中在膜表面,且随着电压绝对值升高,EP 力绝对值增大,膜上聚集的粒子数量增多,这在一定程度上加剧了膜表面结垢。但是由于 DEP 力对已形成的石膏粒子的抑制作用,并结合 ± 3 V 时水通量和结垢变化实验结果分析可知,不同电压下的外加电场对 FO 膜石膏结垢均有抑制作用。

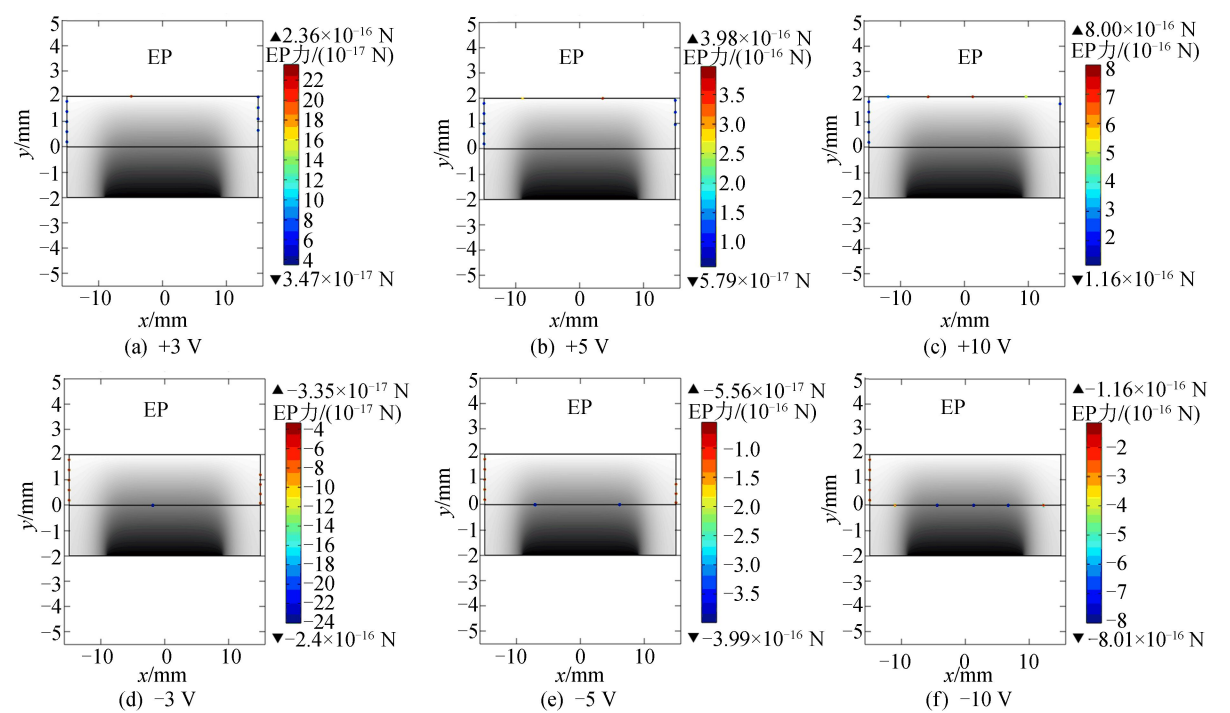


图 8 不同电压下 Ca^{2+} EP 模拟结果

表 3 不同电压下的 EP 力				单位: N	
电压/V	y 向 EP 力		x 向 EP 力		
	最大值	最小值	最大值	最小值	
+3	2.36×10^{-16}	3.47×10^{-17}	4.93×10^{-21}	-2.72×10^{-21}	
-3	-3.35×10^{-17}	-2.40×10^{-16}	4.05×10^{-19}	-4.93×10^{-21}	
+5	3.98×10^{-16}	5.79×10^{-17}	8.22×10^{-21}	-4.53×10^{-21}	
-5	-5.56×10^{-17}	-3.99×10^{-16}	4.30×10^{-17}	-2.07×10^{-17}	
+10	8.00×10^{-16}	1.16×10^{-16}	1.64×10^{-20}	-9.06×10^{-21}	
-10	-1.16×10^{-16}	-8.01×10^{-16}	2.13×10^{-16}	-1.32×10^{-16}	

3 结 论

1) 相对于不加电场,外加 +3、-3V 电场的 FO 膜水通量在 10 h 的运行时间内分别仅下降 11.1%、12.1%,其下降量仅为不加电场时 1/2,且膜表面结垢量明显减少,验证了外加电场有效抑制 FO 膜石膏结垢的可行性。

2) 通过 COMSOL Multiphysics 研究不同电压(± 3 、 ± 5 、 ± 10 V)下的电场变化规律,探究电场变化规律对抑制结垢的影响,进一步研究电场抑制结垢的作用机制。当施加电压为正电压、电场方向为正时,抑制作用将随电压的增大而增大,且施加正电压时对 FO 膜石膏结垢的抑制效果最佳,其原因是 DEP 力和 EP 力的协同作用。但由

于 DEP 力对石膏粒子有较强的抑制作用,不同电压下的外加电场对 FO 膜石膏结垢始终有抑制作用。

外加电场抑制作用适用于 FO 处理废水时遇到的各类膜污染,当污染物为带电粒子时,适当地调整电压正负性会带来更好的抗膜污染效果。研究结果可为电场耦合膜过滤工艺在高盐废水处理中的实际应用提供理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] CUI J R, FENG Y, XU B W, et al. Reactor performance of static magnetic field membrane bioreactor for treating actual high-salt textile dyeing wastewater and possible mechanism on magnetically enhanced membrane fouling control[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 179: 835-846.
- [2] ALI S S, AL-TOHAMY R, SUN J Z. Performance of *Meyerozyma caribbica* as a novel manganese peroxidase-producing yeast inhabiting wood-feeding termite gut symbionts for azo dye decolorization and detoxification[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150665.
- [3] ALI S S, AL-TOHAMY R, KOUTRA E, et al. Valorizing lignin-like dyes and textile dyeing wastewater by a newly constructed lipid-producing and lignin modifying oleaginous yeast consortium valued for biodiesel and bioremediation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123575.
- [4] CHEN W, QIN S M, YANG C X, et al. Bioaugmentation using salt-tolerant bacteria in a dual-stage process for high-salinity wastewater treatment: performance, microbial community, and salt-tolerance mechanism[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 57: 104620.
- [5] CHEN L, ZHOU L T, DING Y C, et al. Enhancing microbial salt tolerance through low-voltage stimulation for improved p-chloronitrobenzene(p-CNB) removal in high-salinity wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2023, 905: 167164.
- [6] YADAV A, SINGH K, PANDA A B, et al. Membrane distillation crystallization for simultaneous recovery of water and salt from tannery industry wastewater using TiO₂ modified poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) nanocomposite membranes[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102393.
- [7] 张文存, 张国辉, 王丽莉, 等. 垃圾渗滤液处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(4): 1207-1211, 1218.
- [8] ABOUNAHIA N, IBRAR I, KAZWINI T, et al. Desalination by the forward osmosis: advancement and challenges[J]. Science of the Total Environment, 2023, 886: 163901.
- [9] 郭文莹. 正渗透联合膜蒸馏技术处理市政污水及高盐废水的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- [10] 王通军. 正渗透法处理脱硫酸废水及膜表面改性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [11] ANSARI A, PEÑA-BAHAMONDE J, WANG M, et al. Polyacrylic acid-brushes tethered to graphene oxide membrane coating for scaling and biofouling mitigation on reverse osmosis membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 630: 119308.
- [12] SUN Z M, ZHANG S H, ZHANG Z G, et al. A novel anti-fouling polyamide thin-film composite forward osmosis membrane fabricated by poly(m-phenylene isophthalamide) for seawater desalination[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11: 110739.
- [13] BAGHERZADEH M, NIKKHOO M, AHADIAN M M, et al. Polyethersulfone/polyamide thin-film nanocomposite membrane decorated by WS₂-Cys-UiO-66-(CO₂H)₂ nanocomposites for forward osmosis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11: 109959.
- [14] WAN H T, ZENG F X, YU H R, et al. Crossflow-induced membrane vibration and its effects on fouling and scaling in direct contact membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 694: 122410.
- [15] LIU L, HE H L, WANG Y D, et al. Mitigation of gypsum and silica scaling in membrane distillation by pulse flow operation[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 624: 119107.
- [16] WANG L L, ZHANG R L, CHEN L, et al. Scalable and universal polyphenol-mediated prussian blue nanocomposite membranes: underliquid dual superlyophobicity and catalytic self-cleaning[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 685: 121971.
- [17] XIE S C, WONG N H, SUNARSO J, et al. Cleaning mechanism of gypsum scaling in hydrophobic porous membranes[J]. Desalination, 2023, 547: 116237.
- [18] 徐晓彤. 纳米复合正渗透膜制备及抗污染性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [19] 徐梦思. 导电正渗透膜的制备及其膜污染缓解机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.

(责任编辑 张淑艳)